



Research Article

(2026) 5(2):53-71

Technovations of Electrical Engineering in Green Energy System

Optimization of PID Controller for Load-Frequency Control in Power System with Hydro-Turbine and Transient Drop Compensator Using Hybrid PSO-NM Algorithm

Ahmad Baghban¹, MSc, Seyed Arman Shirmardi¹, Assistant Professor, Mahyar Abasi^{2,3}, Assistant Professor

¹Department of Electrical Engineering, Karoon Institute of Higher Education, Ahvaz, Iran

²Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran

³Research Institute of Renewable Energy, Arak University, Arak, Iran

Abstract:

This paper presents a novel algorithm for load control of a hydraulic turbine connected to an infinite bus with transient droop compensator. The proposed method utilizes PID control and a hybrid particle swarm optimization algorithm. The considered PID controller can tolerate a wide range of variations in system parameters and stabilize the system without significant overshoots and oscillations. The optimized PID controller has lower overshoot and settling time compared to the non-optimized PID controller. The PID controller also reduces ripple and fluctuations in output power, making it a valuable tool for frequency and power control of hydraulic turbine systems. Overall, the results show that the optimized PID controller can effectively control the frequency and power of hydraulic turbine systems, but in some cases, more advanced control methods may be required. The network under study is modeled in the Simulink environment of MATLAB software. The results obtained from the implementation of various scenarios confirm the correct performance of the proposed algorithm. The optimized PID controller can tolerate a wider range of variations in system parameters. While the non-optimized PID controller may operate without overshoot at $T_w=3$ (hydraulic turbine time constant), the optimized controller stabilizes the system without overshoot up to $T_w=5$.

Keywords: Load-frequency control, Power system, PID controller, Small signal stability, Hydro-turbine.

April 13, Sunday ۲۰۲۵

Received: 11 November 2024

Revised: 13 April 2025

Accepted: 28 April 2025

Corresponding Author: Dr. Mahyar Abasi, m-abasi@araku.ac.ir

DOI: <https://doi.org/10.71691/teeges.2026.1190147>





بهینه‌سازی کنترل کننده PID در جهت کنترل بار-فرکانس در سیستم قدرت مجهز به توربین آبی و جبران کننده افتی گذرا با استفاده از الگوریتم هیبریدی PSO-NM

احمد باغبان^۱، کارشناسی/ارشد، سید آرمان شیرمردی^۱، استادیار، مهیار عباسی^۲، استادیار

۱- گروه مهندسی برق، موسسه آموزش عالی کارون، اهواز، ایران

۲- گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران

۳- پژوهشکده انرژی‌های تجدید پذیر، دانشگاه اراک، اراک، ایران

چکیده: در این مقاله، یک الگوریتم جدید جهت کنترل بار یک توربین آبی متصل به شین بینهایت با جبران کننده افتی گذرا ارائه شده است. روش پیشنهادی در این مقاله از کنترل PID و الگوریتم ترکیبی ازدحام ذرات بهینه‌سازی بهره برده است. کنترل کننده PID در نظر گرفته شده، می‌تواند طیف وسیعی از تغییرات در پارامترهای سیستم را تحمل کرده و بدون اورشوت‌ها و نوسان‌های زیاد، سیستم را پایدار کند. کنترل کننده PID بهینه شده دارای اورشوت و زمان نشست کمتری نسبت به کنترل کننده PID غیر بهینه است. کنترل کننده PID همچنین ریبیل و نوسانات توان خروجی را کاهش می‌دهد، که آن را به یک ابزار ارزشمند برای کنترل فرکانس و توان سیستم‌های توربین آبی تبدیل می‌کند در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که کنترل کننده PID بهینه شده می‌تواند به طور موثری فرکانس و توان سیستم‌های توربین آبی را کنترل کند، اما در برخی موارد ممکن است نیاز به استفاده از روش‌های کنترلی پیشرفته‌تر باشد. شبکه تحت مطالعه در سیمولینک نرم افزار متلب مدلسازی شده است. نتایج حاصل از پیاده سازی سناریوهای مختلف، موید عملکرد صحیح الگوریتم پیشنهادی می‌باشد. کنترل کننده PID بهینه شده می‌تواند تغییرات گسترده تری در پارامترهای سیستم را تحمل کند. در حالی که کنترل کننده PID غیربهینه ممکن است در $T_w=3$ (ثابت زمانی توربین آبی) بدون اورشوت عمل کند، کنترل کننده بهینه تا $T_w=5$ بدون اورشوت سیستم را پایدار نگه می‌دارد.

واژه‌های کلیدی: کنترل بار-فرکانس، سیستم قدرت، کنترل کننده PID، پایداری سیگنال کوچک، توربین آبی.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۳/۰۸/۲۱

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۱/۲۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۰۸

نویسنده مسئول: دکتر مهیار عباسی، m-abasi@araku.ac.ir

DOI: <https://doi.org/10.71691/teeges.2026.1190147>



۱-۱- بیان مسئله

در سال‌های اخیر، با توجه به افزایش نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر و اتصال آنها به شبکه، پایداری سیستم‌های قدرت به چالش کشیده شده است. یکی از مهمترین مسائل در این زمینه، کنترل فرکانس بار (LFC)^۱ است. LFC یک کنترل‌کننده خودکار است که برای حفظ تعادل توان واقعی و صفر کردن خطاهای حالت پایدار در یک سیستم قدرت چند ناحیه‌ای استفاده می‌شود. در مراجع موجود، روش‌های مختلفی برای کنترل فرکانس بار در سیستم‌های قدرت پیشنهاد شده است.

با افزایش منابع انرژی تجدیدپذیر متناوب مانند باد و خورشید، نوسانات در تولید توان افزایش یافته و حفظ تعادل فرکانس دشوارتر می‌شود. این نوسانات می‌توانند منجر به ناپایداری سیستم و حتی خاموشی شوند. کنترل فرکانس بار (LFC) نقش حیاتی در حفظ پایداری سیستم قدرت در برابر این نوسانات دارد. LFC با تنظیم خروجی ژنراتورها، تعادل بین تولید و مصرف توان را حفظ می‌کند. این کنترل‌کننده با استفاده از الگوریتم‌های مختلف، تغییرات بار و تولید را تشخیص داده و به سرعت به آنها پاسخ می‌دهد.

روش‌های مختلفی برای طراحی کنترل‌کننده‌های LFC وجود دارد، از جمله روش‌های کلاسیک مانند کنترل PID و روش‌های پیشرفته‌تر مانند کنترل تطبیقی و کنترل مقاوم. انتخاب روش مناسب به عوامل مختلفی مانند پیچیدگی سیستم، نوع منابع انرژی تجدیدپذیر و الزامات عملکردی بستگی دارد. تحقیقات در زمینه LFC به منظور بهبود عملکرد و پایداری سیستم‌های قدرت در حضور منابع انرژی تجدیدپذیر ادامه دارد که در بخش بعدی به برخی از مهم‌ترین آنها خواهیم پرداخت.

۱-۲- مرور پژوهش‌های پیشین

در مرجع [۱]، روشی مبتنی بر ساختار متغیر برای حل مساله کنترل فرکانس-بار در سیستم‌های تولید برق قدرت ارائه شده است. این روش، ویژگی‌های هر دو ساختار متغیر و سیستم‌های فازی را برای دستیابی به عملکرد و استحکام بالا ترکیب می‌کند. در پژوهشی دیگر [۲]، یک روش جدید برای بهینه‌سازی یک کنترلر فرکانس-بار تناسبی مبتنی بر منطق فازی (FLPI)^۲ با استفاده از الگوریتم جستجوی تابو چندگانه مورد بررسی قرار گرفته است. این روش، توابع عضویت و قوانین کنترل را به صورت همزمان تنظیم می‌کند تا عملکرد و استحکام سیستم را بهبود بخشد. مرجع [۳]، یک روش جدید برای کنترل فرکانس بار یک نیروگاه آبی کوچک مجزا ارائه کرده است. این روش، با کنترل توان ورودی نیروگاه آبی و استفاده از کنترل‌های روشن/خاموش، اندازه بار تخلیه را کاهش می‌دهد و هزینه تخلیه را به میزان قابل توجهی کمتر از شیرهای آب می‌کند. همچنین در پژوهشی دیگر، مدلسازی، تحلیل و شبیه‌سازی کنترل فرکانس-بار در دو سیستم قدرت و تغییرات پارامترها مورد بررسی قرار گرفته و همچنین معادلات حالت یک LFC در سیستم توان دو ناحیه‌ای برای توربین بخار ارائه شده است [۴]. در مرجع [۵]، نقش اساسی کنترل فرکانس-بار خودکار (ALFC)^۳ در کنترل توان و فرکانس واقعی مورد بحث قرار گرفته است. معادلات حالت سیستم برای توربین بخار (با گرمکن مجدد و بدون گرمکن مجدد) و توربین‌های آبی^۴ (با جبران‌ساز و بدون جبران‌ساز) ارائه شده است. در [۶] نیز یک روش تنظیم PID^۵ یکپارچه برای کنترل فرکانس-بار سیستم‌های قدرت مورد بحث قرار گرفته است. این روش، بر اساس روش طراحی مدل داخلی دو درجه آزادی (TDF)^۶ و روش تقریب PID است. مرجع [۷] نیز یک روش طراحی کنترل‌کننده بار-فرکانس مد لغزشی گسسته برای سیستم قدرت ارائه کرده است. این کنترل‌کننده، برای هر دو سیستم قدرت با نیروگاه آبی و حرارتی طراحی شده است و با استفاده از بازخورد حالت کامل، تمام حالت‌های سیستم را اندازه‌گیری می‌کند. مطالعه [۸]، یک روش حل برای کنترل فرکانس-بار یک سیستم برق آبی-حرارتی متصل به هم با استفاده از یک کنترل‌کننده ترکیبی فازی-PID ارائه کرده است که با ترکیب یک کنترل‌کننده فازی نوع PID با یک کنترل‌کننده PID متداول، عملکرد و استحکام کنترل‌کننده را افزایش می‌دهد.

در مرجع [۹]، یک کنترل‌کننده بهینه غیرمتمرکز مبتنی بر مقادیر ویژه ماتریس مشخصه و روش لیپانوف به عنوان یک روش مناسب برای مساله کنترل فرکانس-بار پیشنهاد شده است. همچنین در مطالعه دیگری، یک روش طراحی کنترل‌کننده فیدبک خروجی بهینه برای LFC یک سیستم قدرت واقعی پیشنهاد شده است که عملکرد کنترل‌کننده را بر روی سیستم قدرت چند منبعی نشان می‌دهد و تاثیر محدودیت‌های عملیاتی (GRC) بر پاسخ انحراف فرکانس را مورد بحث قرار می‌دهد [۱۰]. مرجع [۱۱]، مشارکت پویا DFIG^۷ برای کنترل فرکانس یک سیستم قدرت دو ناحیه‌ای متصلی به هم در بازار برق رقابتی تجدید ساختار یافته مورد بررسی قرار داده





است. در این مقاله، یک تابع پشتیبانی کنترل فرکانس که متناسب با انحراف فرکانس پاسخ می‌دهد، پیشنهاد شده است تا انرژی جنبشی توربین بادی را برای بهبود پاسخ فرکانسی سیستم آزاد کند. همچنین در مطالعه ای دیگر، کنترل تولید خودکار با سیستم برق آبی دو واحدی متصل به هم و دو سیستم دیگر به عنوان ترکیبی حرارتی و حرارتی مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله، عملکرد گذرای تطبیقی دو حالت به صورت تغییر فاز کنترل شده با ترستور در مسیر با خط اتصال در هماهنگی با ذخیره انرژی ابرسانا (SMES)^۸ مورد بررسی قرار گرفته است [۱۲]. در پژوهشی دیگر [۱۳]، یک کنترل کننده فرکانس-بار برای سیستم‌های قدرت متصل به هم چند ناحیه‌ای با عدم قطعیت تطبیق طراحی شده است. این کنترل کننده، با استفاده از روش قانون دست یابی، نوسانات فرکانس را پس از تغییر بار و نقطه عملیات به صفر همگرا می‌کند.

مرجع [۱۴]، یک ساختار کنترلی جدید با یک روش تنظیم برای طراحی کنترل کننده فرکانس-بار PID برای سیستم‌های قدرت ارائه کرده است. در این مقاله، کنترل کننده برای سیستم قدرت تک ناحیه‌ای طراحی شده است و سپس به حالت چند ناحیه‌ای تعمیم داده می‌شود. مرجع [۱۵]، نشان می‌دهد که با افزایش تقاضای انرژی الکتریکی، نیاز زیادی به داشتن یک سیستم LFC کارآمد وجود دارد که می‌تواند عدم قطعیت پارامتر سیستم را کنترل کند. در این مقاله، کنترل فرکانس-بار نقش بسیار مهمی در تامین توان کیفیت در سیستم‌های قدرت ایزوله و متصل به هم دارد. مقاله [۱۶]، پایداری سیگنال کوچک کنترل بار-فرکانس با توربین آبی توصیف شده است. در این مقاله، تاثیر تغییرات پارامتر بر رفتار دینامیکی سیستم قدرت بررسی شده است. در مطالعه‌ای دیگر [۱۷]، یک روش بهینه برای تنظیم کنترل کننده تناسبی، انتگرالی و مشتق PID برای یک توربین هیدرولیکی کوپل شده با تصحیح افت گذرای متناظر ارائه شده است. همچنین پژوهشی دیگر، یک مدل ساده و در عین حال دقیق از تابع تبدیل یک واحد نیروگاهی برق آبی ارائه کرده است. در این مقاله، فرم یکپارچه ای از تابع تبدیل کل سیستم قدرت شامل تعداد نامحدودی واحدهای نیروگاهی برق آبی و حرارتی ارائه شده است [۱۸]. مرجع نیز [۱۹]، یک طراحی کنترل مقاوم برای ژنراتورهای برق با قابلیت تفکیک پذیری بالا در سیستم‌های قدرت ارائه کرده است. در این مقاله، یک چارچوب طراحی کنترل مقاوم مبتنی بر H^∞ برای ژنراتورهای آبی جهت کاهش انحرافات فرکانسی ایجاد شده است. در مرجع [۲۰]، ذکر شده است که نیروگاه‌های برق آبی خرد معمولاً بر روی کوه‌ها ساخته می‌شوند تا برق مناطق روستایی را تامین کنند. در این مقاله، بررسی جامعی از کنترل فرکانس-بار در نیروگاه برق آبی کوچک انجام شده است. مطالعه [۲۱]، پتانسیل بالای توان آبی خرد برای فرصت‌های خارج از شبکه در ویتنام را نشان می‌دهد. مرجع [۲۲] نیز، یک روش مبتنی بر کنترل پیش بین مدل برای کنترل مقاوم فرکانس بار در یک ریزش‌بکه جزیره ای ارائه می‌دهد. در پژوهش [۲۳]، طراحی یک کنترل کننده بهینه چند عاملی^۹ توزیع شده برای کنترل فرکانس-بار و اهداف بهینه جریان توان مورد بررسی قرار گرفته است. مرجع [۲۳] نیز، نشان داده است که سهم اولیه تنظیم فرکانس انرژی الکتریکی (PFRCEE) یک شاخص مهم برای ارزیابی عملکرد واحدهای برق آبی است. در مرجع [۲۴] نیز، اهداف افزایش پایداری نیروگاه‌های برق آبی در عملیات جزیره مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین در مطالعه‌ای دیگر، یک روش هوشمند برای کنترل فرکانس-بار LFC نیروگاه‌های برق آبی کوچک (SHPs) ارائه شده است [۲۵، ۲۶]. مرجع [۲۷] به بررسی کنترل فرکانس-بار در نیروگاه‌های برق آبی کوچک می‌پردازد و کنترل کننده‌ای مبتنی بر منطق فازی ارائه می‌دهد. مرجع [۲۸] نیز، به بررسی کاربردهای کنترل کننده‌های تناسبی-انتگرالی-مشتق PID و مرتبه کسری PID، FOPID در سیستم‌های انرژی هیبریدی انرژی هسته ای-تجدیدپذیر پرداخته است.

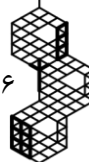
۱-۳- چالش‌ها و ضرورت تحقیق

با توجه به مراجع مرور شده، نواقص کلی مراجع به شرح زیر است:

تنوع محدود در نوع کنترل کننده‌ها: بسیاری از مراجع بر روی کنترل کننده‌های خاص مانند PID، فازی یا مد لغزشی تمرکز کرده‌اند و تنوع کافی در بررسی روش‌های کنترلی مختلف وجود ندارد.

عدم توجه کافی به منابع انرژی تجدیدپذیر: با وجود افزایش نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر، برخی از مراجع به طور کامل اثرات آنها را در کنترل فرکانس-بار در نظر نگرفته‌اند.

ساده‌سازی بیش از حد مدل‌ها: برخی از مراجع از مدل‌های ساده شده برای سیستم‌های قدرت استفاده کرده‌اند که ممکن است دقت نتایج را کاهش دهد.





عدم بررسی کافی اثرات تغییر پارامترها: تغییر پارامترهای سیستم می‌تواند تاثیر قابل توجهی بر عملکرد کنترل‌کننده داشته باشد، اما برخی از مراجع این موضوع را به طور کامل بررسی نکرده‌اند.

محدودیت در سیستم‌های مورد مطالعه: برخی از مقالات فقط به بررسی سیستم‌های تک ناحیه‌ای پرداخته‌اند و قابلیت تعمیم سیستم‌های چند ناحیه‌ای را بررسی نکرده‌اند.

۱-۴- سهم تحقیقاتی و نوآوری‌ها

کمبود بررسی اثرات جبران‌کننده‌های اف‌تی گذرا: در برخی مراجع اثرات جبران‌کننده‌های اف‌تی گذرا به صورت کامل بررسی نشده است. در این مقاله، روش‌های مختلف کنترل بار-فرکانس در سیستم‌های قدرت مورد بررسی قرار گرفته است. مشخص شد که هر روش دارای مزایا و معایبی است، بنابراین کنترل‌کننده PID به عنوان یک راه حل پیشنهادی معرفی شده است. کنترل‌کننده PID با اضافه کردن یک صفر در مبدأ تابع انتقال، بدون توجه به مقادیر پارامترهای آن، خطای دائمی فرکانس را به صفر نزدیک می‌کند. این مقاله همچنین به بررسی پایداری سیگنال کوچک در سیستم کنترل بار-فرکانس با توربین آبی می‌پردازد و نشان می‌دهد که چگونه تغییر پارامترهایی مانند ثابت اینرسی، زمان شروع آب و ثابت تنظیم سرعت بر رفتار دینامیکی سیستم تأثیر می‌گذارد. علاوه بر این، استفاده از جبران‌کننده اف‌تی گذرا در پاسخ توربین آبی با آنالیز مقادیر ویژه و شبیه‌سازی رفتار دینامیکی سیستم قدرت مورد بحث قرار گرفته است. در نهایت، کنترل‌کننده PID برای کنترل بار-فرکانس نیروگاه برق آبی طراحی شده و تأثیر تغییر بهره‌های کنترل‌کننده بر سیستم مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۱-۵- بخش‌بندی مقاله

در ادامه در بخش ۲ به مدلسازی نیروگاه برق آبی و روش فرا ابتکاری مورد استفاده پرداخته می‌شود، در بخش ۳ به شبیه‌سازی و تحلیل نتایج و در بخش ۴ نتیجه‌گیری کلی مقاله بیان می‌شود.

۲- مدلسازی نیروگاه برق آبی

در یک سیستم قدرت، حفظ فرکانس پایدار برای عملکرد صحیح و کارآمد ضروری است. فرکانس باید در محدوده قابل قبولی حفظ شود تا از تلاش کل ظرفیت تولید برای متعادل کردن بار کلی جلوگیری شود. با این حال، تغییرات پویا در تولید و تقاضا ممکن است منجر به عدم تعادل موقت بین کل تولید و تقاضا شود، که انحراف فرکانس را ایجاد می‌کند. اگر انحراف فرکانس از آستانه خاصی عبور کند، می‌تواند بر عملکرد، قابلیت اطمینان^۱، کارایی و امنیت سیستم قدرت تأثیر بگذارد. کنترل فرکانس ثانویه، مرحله دوم بازیابی فرکانس در یک سیستم قدرت است که از ظرفیت ذخیره چرخشی و غیرچرخشی برای متعادل کردن بار و فرکانس سیستم استفاده می‌کند. اهداف اصلی کنترل فرکانس عبارتند از: صفر کردن انحراف فرکانس، حداقل کردن بالا زدگی و زمان نشست انحرافات فرکانس و توان خطوط بین ناحیه‌ای، و حفظ تعادل بین توان تولیدی و مصرفی. ابزارهای حفظ فرکانس شامل واحدها و نیروگاه‌های ذخیره‌ای، کاهش ولتاژ، حذف بار و کنترل‌کننده‌های فرکانس است. هدف از کنترل فرکانس، حفظ سنکرونیسم ژنراتورها و تعادل توان در سیستم است، و انحراف فرکانس سیستم نباید از ۱٪ مقدار نامی آن بیشتر شود. در شکل (۱) مراحل مختلف کنترل فرکانس آورده شده است [۲۹].

۲-۱- مدل دینامیکی توربین

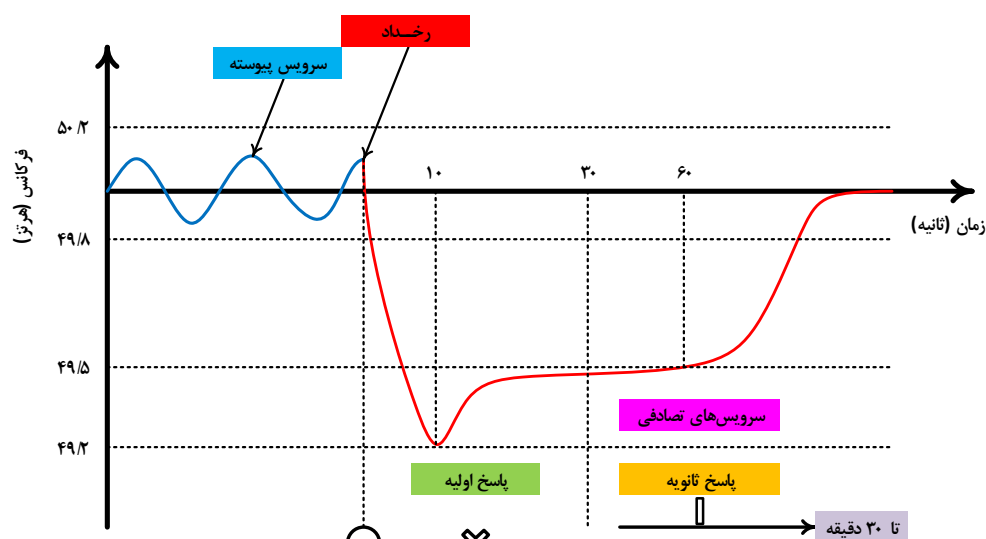
به طور خلاصه یک طرح ساده نیروگاه آبی در شکل (۲) نشان داده شده است. آب مخزن وارد تونل شده و قبل از رسیدن به ورودی توربین آبی از درون پنستاک جریان می‌یابد. سپس به درون محفظه لغزش جریان می‌یابد که به طور یکنواخت آن را در اطراف تیغه‌های دوندۀ توزیع می‌کند. دوندۀ روی یک شفت مشترک با ژنراتور الکتریکی سوار می‌شود. جریان آب به داخل توربین با استفاده از دریچه تنظیم می‌شود که توسط یک سرومیکانیسم هیدرولیکی روغن که توسط کنترلر کنترل می‌شود باز و بسته می‌شود. کنترلر هر زمان که یک عدم تطابق بین گشتاور توسعه‌یافته و تقاضای الکتریکی روی مولد وجود دارد، عمل می‌کند [۳۰]. برای یک تغییر کوچک حول یک نقطه عملیاتی، معادله خطی شده توربین با استفاده از تقریب سری تیلور را می‌توان به شکل رابطه (۱) نشان داد [۳۰]:





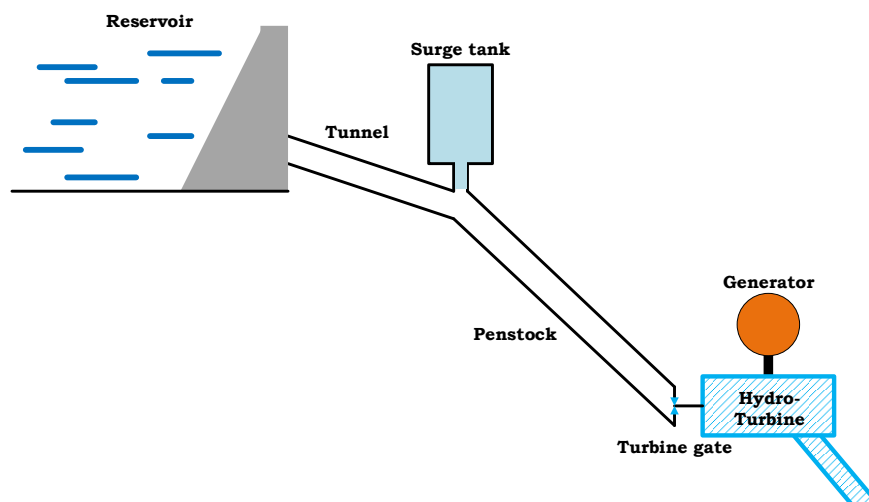
جدول (۱): واژه نامه

متغیر	شرح	متغیر	شرح
Δq	تغییر موقعیت دریچه	Z_p	جریان بر حسب فرکانس مختلط
Δp_m	تغییرات توان مکانیکی	T_e	هد افزایشی
Δh	تغییر ارتفاع	F	تلفات اصطکاک هیدرولیکی
Δz	تغییرات زاویه	ΔG	تغییرات موقعیت پره راهنما
Δw	تغییرات سرعت آب	T_w	ثابت زمانی توربین آبی
h	ارتفاع	T_R	زمان طولانی بازنشانی میراکننده مکانیکی
T_1-T_7	مقادیر ثابت نرمالیزه شده	ΔX_G	تغییرات میزان باز شدگی دریچه آب
RT	شیب موقتی افقی	ΔP_G	تغییرات خروجی گاورنر آبی بدون جبران کننده
a_{ij}	ثابت‌های توربین	T_M	زمان شروع مکانیکی
ΔH	تغییرات طول پنستاک	K_1-K_6	پارامترهای سیستم و نقطه کار ماشین
ΔQ	تغییرات دبی	K_G	ضریب گاورنر
P_G	خروجی گاورنر آبی بدون جبران کننده	ΔP_R	تغییرات مرجع بار
ΔP_D	تغییرات بار	$H_{PR}(s)$	نسبت تغییرات فرکانس به تغییرات توان مبنا
$H_{FD}(s)$	تغییرات بار مصرفی	K_C	تابعی از بهره‌ها و ثابت زمانی‌های سیستم
K_P	ضریب کنترلر تناسبی	K_I	ضریب کنترلر انتگرالی
K_D	ضریب کنترلر مشتق گیر	$\Delta \omega r$	تغییرات سرعت رتور
$\Delta \delta$	تغییرات زاویه روتور	J_M	ممان اینرسی ماشین سنکرون
$G_T(s)$	تابع انتقال توربین	$G_M(s)$	توابع انتقال جرم چرخان و بار
$G_C(s)$	تابع انتقال جبران کننده	$G_G(s)$	تابع انتقال گاورنر
E_F	ولتاژ تحریک دیده شده از آرمیچر	$\dot{T}_{do}$	ثابت زمانی گذرای مدار باز
P_M	گشتاور مکانیکی	δ	زاویه گشتاور
ω_b	سرعت زاویه ای مبنا	ω_r	سرعت رتور



شکل (۱): نمودار مراتب کنترل فرکانس بر حسب زمان





شکل (۲): مدل دینامیکی توربین آبی.

$$\begin{aligned}\Delta q &= a_{11}\Delta h + a_{12}\Delta z + a_{13}\Delta w = T_1 h + T_2 z + T_3 w \\ \Delta p_m &= a_{21}\Delta h + a_{22}\Delta z + a_{23}\Delta w = T_5 h + T_6 z + T_7 w\end{aligned}\quad (1)$$

در جدول (۱)، فهرست علائم شرح داده شده است.

a_{ij} ($i=1,2; j=1,2,3$) ثابت‌های توربین مشتقات جزئی جریان و گشتاور با توجه به سر، پره راهنما و سرعت توربین هستند. ضرایب a_{ij} به بار توربین بستگی دارد و ممکن است از ویژگی‌های توربین در یک نقطه عملیاتی ارزیابی شود. مقادیر آنها برای تغییر در نزدیکی نقطه عملیاتی نامی توربین ثابت می‌ماند. این مقادیر باید به دقت اندازه‌گیری شوند یا از تست‌های مدل توربین گرفته شوند. پنستاک را می‌توان به صورت یک خط انتقال هیدرولیکی که توسط مدار باز در توربین و یک مدار اتصال کوتاه در مخزن به پایان می‌رسد، نشان داد. در اینجا در این پژوهش اثر تونل و مخزن موجی برای بحث در نظر گرفته نشده است. تابع انتقال پنستاک مربوط به هد افزایشی و جریان برحسب فرکانس مختلط را می‌توان به صورت رابطه (۲) نوشت [۳۰]:

$$\frac{\Delta H(s)}{\Delta Q(s)} = -Z_p \tanh(sT_e + F) \quad (2)$$

این رابطه تنها به طول پنستاک بستگی دارد و مستقل از ویژگی‌های توربین است.

یک معادله تابع تبدیل غیرمنطقی (۳) از توربین-پنستاک با اثر ستون آب الاستیک، که از معادلات (۱) و (۲) مشتق شده است، نسبت گشتاور افزایشی را به تغییرات موقعیت پره راهنما به صورت رابطه (۳) مرتبط می‌کند [۳۰]:

$$\frac{\Delta P_m(s)}{\Delta G(s)} = \frac{a_{23} + (a_{11}a_{23} - a_{21}a_{13}) Z_p \tanh(sT_e + F)}{1 + a_{11} Z_p \tanh(sT_e + F)} \quad (3)$$

با فرض مدل ایده‌آل و نادیده گرفتن تلفات اصطکاک هیدرولیکی، معادله (۳) را می‌توان به صورت (۴) خلاصه نمود [۳۰]:

$$\frac{\Delta P_m(s)}{\Delta G(s)} = \frac{1 - Z_p \tanh(sT_e)}{1 + 0.5 Z_p \tanh(sT_e)} \quad (4)$$

معادله (۳) یک مدل پارامتری توزیع‌شده توربین را نشان می‌دهد. با فرض $\tanh(sT_e) \approx sT_e$ یک تابع انتقال مرتبه اول خطی شده از معادله (۴) را می‌توان به صورت رابطه (۵) بیان کرد [۳۰]:

$$\frac{\Delta P_m(s)}{\Delta G(s)} = \frac{1 - sT_w}{1 + s 0.5 T_w} \quad (5)$$



که در آن T_w ثابت زمانی توربین آبی با بار تغییر می‌کند و در بار کامل بین ۰/۵ تا ۵ ثانیه است و با سرعت آب در حالت ماندگار و طول کانال رابطه مستقیم و با ارتفاع آب در محل دریچه در حالت ماندگار و شتاب ناشی از نیروی کشش زمین رابطه معکوس دارد. تابع تبدیل توربین یک صفر در سمت راست و یک قطب در سمت چپ محور موهومی دارد و توربین یک سیستم ناکمینه فاز است. به علت وجود صفر در سمت راست محور موهومی، پاسخ فرکانسی سیستم تأخیر فاز بیشتری دارد و کنترل این نوع سامانه‌ها مشکل است [۳].

۲-۲- مدل دینامیکی جبران کننده

زمانی که دریچه آب برای جبران افزایش بار باز می‌شود، در ابتدا با کاهش فشار توربین، تغییر اولیه کوتاه مدتی در توربین به وجود می‌آید که خلاف جهت تغییر موقعیت دریچه است. ولی با شتاب گرفتن آب و افزایش سرعت آن در لوله هدایت آب، فشار آب افزایش می‌یابد و باعث افزایش توان تولیدی ژنراتور و نهایتاً توازن توان اکتیو می‌گردد. بنابراین گاورنرهای توربین آبی باید دارای افت گذرای زیادی باشند و برای عملکرد مطلوب و پایدار کنترل سرعت، گاورنر واحد برق آبی نیاز به جبران ساز گذرای افتی دارد. در گاورنر نیروگاه برق آبی برای مقابله با اثرات اینرسی آب در مسیر شیبدار پستاک در حالت گذرا علاوه بر حلقه مشخصه افتی دائم یک حلقه دروپ موقت وجود دارد که با اثر غیر کمینه فازی مقابله می‌کند. دروپ موقت شامل یک بهره همراه با مشتق گیر ثابت زمانی است. تابع انتقال جبران کننده افتی گذرا عبارت است از معادله (۶) [۱۱]:

$$G_c(s) = \frac{\Delta X_G}{\Delta P_G} = \frac{1 + T_R s}{1 + \alpha T_R s} \quad (6)$$

که در (۶) ΔP_G تغییرات خروجی گاورنر آبی بدون جبران کننده و ΔX_G تغییرات میزان باز شدگی دریچه آب است. T_R زمان طولانی بازنشانی میراکننده مکانیکی است و مقدار آن بین ۲/۵ الی ۲۵ تغییر پیدا می‌کند. پارامتر α نسبت شیب موقتی افتی (R_T) به شیب دائمی افتی (R_P) است و هر دو به زمان عبور آب بستگی دارند. محدوده تغییرات آن‌ها به ترتیب ۱-۲/۰ و ۰/۰۶-۰/۰۳ است مقدار بهینه T_R و R_T با استفاده از روابط (۷) و (۸) تعیین می‌شوند [۱۱].

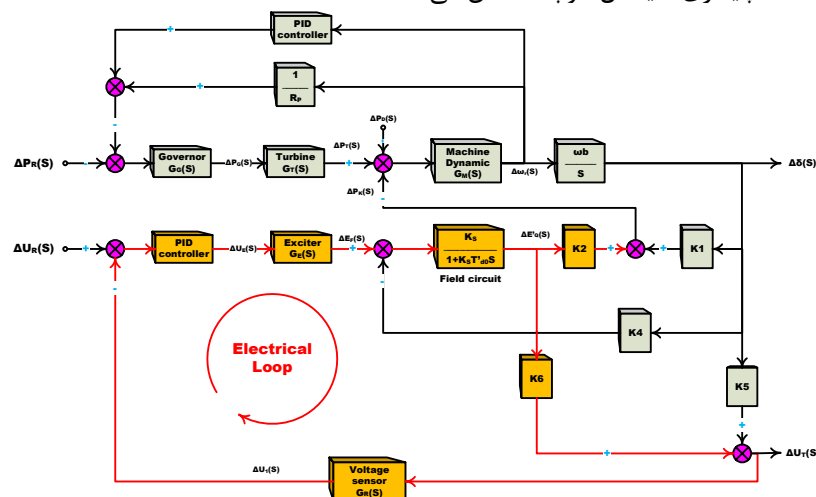
$$T_R = T_w[5 - 0.5(T_w - 1)] \quad (7)$$

$$R_T = \frac{T_w}{T_M}[2.3 - 0.15(T_w - 1)] \quad (8)$$

که در آن T_M زمان شروع مکانیکی بوده و محدوده تغییر آن بین ۶ تا ۱۲ است.

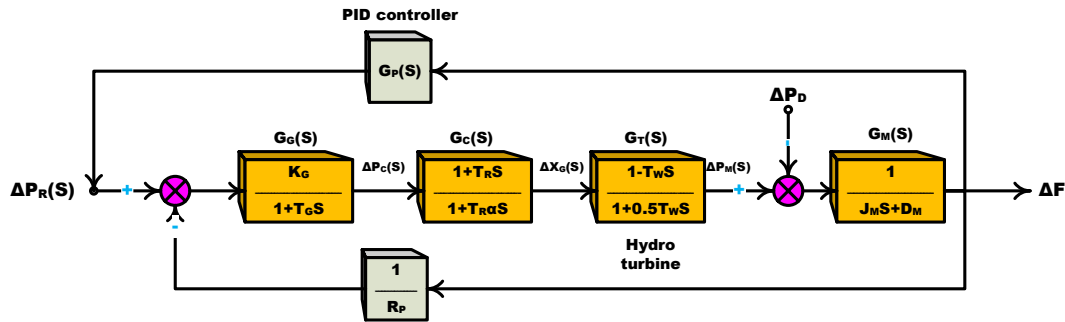
۲-۳- معادلات سیستم حلقه باز

شکل (۳) بلوک دیاگرام خطی یک سیستم قدرت تک ماشین متصل به شین بی نهایت شامل تنظیم کننده ولتاژ، توربین، گاورنر و ماشین سنکرون را برای مطالعه پایداری سیگنال کوچک نشان می‌دهد.



شکل (۳): بلوک دیاگرام خطی یک سیستم قدرت تک ماشین متصل به شین بی نهایت





شکل (۴): نمودار بلوکی یک واحد تولید با توربین آبی با کنترل کننده PID "

ثابت‌های K_1 الی K_6 به پارامترهای سیستم و نقطه کار ماشین سنکرون وابسته هستند. پارامترهای K_1 و K_2 از گشتاور الکتریکی تولید شده ژنراتور، پارامترهای K_3 و K_4 از معادله ولتاژ تحریک و پارامترهای K_5 و K_6 از معادله ولتاژ ترمینال ژنراتور تعیین می‌شوند [۳۱]. توابع انتقال جرم چرخان و بار، گاورنر، جبران‌کننده و توربین به ترتیب $G_M(s)$ ، $G_T(s)$ ، $G_C(s)$ ، $G_G(s)$ هستند. $\dot{T}_{do}$ ثابت زمانی گذرای مدار بار، E_F ولتاژ تحریک دیده شده از آرمیچر، δ زاویه گشتاور، P_M گشتاور مکانیکی، ω_r سرعت رتور و ω_b سرعت زاویه ای مینا هستند. تابع انتقال حلقه الکتریکی نسبت تغییرات گشتاور الکتریکی در اثر ولتاژ گذرای محور عرضی ($\dot{E}_q$) به تغییرات سیگنال ولتاژ مرجع یا سیگنال خروجی کنترل‌کننده تکمیلی را نشان می‌دهد [۳۲]. با در نظر گرفتن مدل مرتبه سوم برای ماشین سنکرون و سیستم تحریک مرتبه اول نوع IEEE-DCI با بهره K_A و ثابت زمانی T_A ، معادلات خطی شده عبارتند از روابط (۹) الی (۱۲):

$$\frac{d}{dt} \Delta \delta = \omega_b \Delta \omega_r \quad (9)$$

$$\frac{d}{dt} \Delta \omega_r = -\frac{K_1}{J_M} \Delta \delta - \frac{K_D}{J_M} \Delta \omega_r - \frac{K_2}{J_M} \Delta \dot{E}_q + \frac{1}{J_M} \Delta P_M \quad (10)$$

$$\frac{d}{dt} \Delta \dot{E}_q = -\frac{K_4}{T_{do}} \Delta \delta - \frac{1}{K_3 T_{do}} \Delta \dot{E}_q + \frac{1}{T_{do}} \Delta E_F \quad (11)$$

$$\frac{d}{dt} \Delta E_F = \frac{K_A}{T_A} \Delta U_R - \frac{K_A K_5}{T_A} \Delta \delta - \frac{K_A K_6}{T_A} \Delta \dot{E}_q - \frac{1}{T_A} \Delta E_F \quad (12)$$

که در آن J_M ممان اینرسی ماشین سنکرون و K_D ضریب اصطکاک یا ضریب گشتاور میرا کننده هستند. شکل ۴ نمودار بلوکی یک واحد تولید با توربین آبی با کنترل کننده PID را نشان می‌دهد که در آن گاورنر دارای جبران‌ساز گذرای افقی است و ΔP_D تغییرات بار و ΔP_R تغییرات مرجع بار است. سیستم قدرت بدون جبران‌کننده، مرتبه سوم و سیستم قدرت با جبران‌کننده مرتبه چهارم هستند. با انتخاب متغیرهای حالت به صورت $X_1 = \Delta f$ ، $X_2 = \Delta P_M$ ، $X_3 = \Delta X_G$ ، $X_4 = \Delta P_G$ ، و دو ورودی $U_1 = \Delta P_D$ و $U_2 = \Delta P_R$ معادله دیفرانسیل متغیرهای حالت عبارت اند از روابط (۱۳) الی (۱۶):

$$\frac{d}{dt} x_1 = -\frac{1}{T_P} x_1 + \frac{K_P}{T_P} x_2 - \frac{K_P}{T_P} u_1 \quad (13)$$

$$\frac{d}{dt} x_2 = \frac{2K_G}{\alpha R_P T_G} x_1 - \frac{2}{T_W} x_2 + \left(\frac{2}{T_W} + \frac{2}{\alpha T_R} \right) x_3 + \frac{2}{\alpha} \left(\frac{1}{T_G} - \frac{1}{T_R} \right) x_4 - \frac{2K_G}{\alpha T_G} u_2 \quad (14)$$

$$\frac{d}{dt} x_3 = \frac{-K_G}{\alpha R_P T_G} x_1 - \frac{1}{\alpha T_R} x_3 + \frac{1}{\alpha} \left(\frac{1}{T_R} - \frac{1}{T_G} \right) x_4 + \frac{K_G}{\alpha T_G} u_2 \quad (15)$$

$$\frac{d}{dt} x_4 = -\frac{K_G}{T_G R_P} x_1 - \frac{1}{T_G} x_4 - \frac{K_G}{T_G} u_2 \quad (16)$$

که در آن K_G و T_G به ترتیب بهره و ثابت زمانی گاورنر هستند. سیستم حلقه باز مجهز به جبران‌کننده دارای چهار مقدار ویژه است و معادله مشخصه سیستم را می‌توان بصورت رابطه (۱۷) در نظر گرفت [۵]:





$$\Delta_o(s) = s^4 + p_3 s^3 + p_2 s^2 + p_1 s + p_0 \quad (17)$$

که در آن ضرایب چند جمله‌ای $P_0 - P_3$ به پارامترهای سیستم وابسته هستند و به صورت روابط (۱۸) تا (۲۱) بیان می‌شوند:

$$p_0 = \frac{K_C}{K_G} \left(1 + \frac{K_C K_P}{R_P} \right) \quad (18)$$

$$p_1 = \frac{1}{\alpha T_R} \left(\frac{2}{T_W T_P} + \frac{2}{T_W T_G} + \frac{1}{T_G T_P} \right) + \frac{2}{T_W T_G T_P} - \frac{2 K_G K_P}{\alpha R_P T_G T_P} \left(\frac{1}{T_R} - \frac{1}{T_W} \right) \quad (19)$$

$$p_2 = \left(\frac{1}{\alpha T_R} + \frac{1}{T_G} \right) \left(\frac{2}{T_W} + \frac{1}{T_P} \right) + \frac{2}{T_W T_P} + \frac{1}{\alpha T_G} \left(\frac{1}{T_R} - \frac{2 K_G K_P}{T_R T_P} \right) \quad (20)$$

$$p_3 = \frac{1}{\alpha T_R} + \frac{1}{T_G} + \frac{2}{T_W} + \frac{1}{T_P} \quad (21)$$

ضرایب P_0 و P_3 همیشه مثبت و ضرایب P_1 و P_2 می‌توانند منفی باشند. شرط لازم برای پایداری، مثبت بودن ضرایب P_1 و P_2 است. با توجه به محدوده تغییرات T_W ، ضرایب P_1 همیشه مثبت خواهد بود.

با توجه به بلوک دیاگرام مستقل واحد تولید با توربین آبی بدون کنترل‌کننده، تغییرات فرکانس بر اساس دو ورودی عبارت است از رابطه (۲۲):

$$\Delta F(s) = H_{PR}(s) \Delta P_R(s) - H_{FD}(s) \Delta P_D(s) \quad (22)$$

که در آن $H_{PR}(s)$ و $H_{FD}(s)$ به ترتیب نسبت تغییرات فرکانس به تغییرات توان مینا و تغییرات بار مصرفی است. تابع انتقال تغییرات فرکانس نسبت به تغییرات مرجع بار برای طراحی سیستم کنترل اهمیت دارد و برابر است با رابطه (۲۳):

$$H_{PR}(s) = \frac{\Delta F(s)}{\Delta P_R(s)} = \frac{K_C}{\Delta_o(s)} (1 + T_R s) (1 - T_W s) \quad (23)$$

که در آن ثابت K_C تابعی از بهره‌ها و ثابت زمانی‌های سیستم است و برابر است با رابطه (۲۴):

$$K_C = \frac{2 K_G K_P}{\alpha T_G T_R T_W T_P} \quad (24)$$

تابع انتقال مدار باز سیستم دارای دو صفر در $1/T_W$ و $-1/T_R$ است. تابع انتقال تغییرات فرکانس نسب به تغییرات توان مرجع عبارت است از رابطه (۲۵):

$$H_{FD}(s) = \frac{\Delta F(s)}{\Delta P_D(s)} = \frac{K_C}{K_G \Delta_o(s)} (1 + T_G s) (1 + 0.5 T_W s) (1 + \alpha T_R s) \quad (25)$$

اگر تغییرات بار به صورت پله ای در نظر گرفته شود، مقدار حالت دائمی تغییرات فرکانس مستقل از ثابت‌های زمانی T_W و T_G است و برابر است با رابطه (۲۶):

$$\Delta f(\infty) = \lim_{z \rightarrow 0} \Delta F(s) = - \frac{R_P}{R_P + K_G K_P} \quad (26)$$

تابع انتقال تغییرات فرکانس نسبت به تغییرات بار در سیستم حلقه بسته برابر است با رابطه (۲۷):

$$H_C(s) = \frac{\Delta F(s)}{\Delta P_D(s)} = \frac{-H_{FD}(s)}{1 + H_{FD}(s) G_P(s)} \quad (27)$$

که در آن $G_P(s)$ تابع انتقال کنترل‌کننده سه ترمی متناسب- انتگرال گیر - مشتق گیر (PID) است. کنترل‌کننده PID یک صفر در مبدأ به تابع انتقال اضافه می‌کند. بنابراین بدون توجه به مقادیر پارامترهای کنترل‌کننده PID خطای دائمی فرکانس با اضافه شدن کنترل‌کننده به صفر میل می‌کند. با اضافه شدن کنترل‌کننده PID مقادیر ویژه حلقه بسته از رابطه (۲۸) تعیین می‌شوند:

$$1 + H_{FD}(s) G_P(s) = 0 \quad (28)$$

بنابراین معادله مشخصه حلقه بسته سیستم عبارت است از رابطه (۲۹):





$$\Delta_C(s) = s^5 + (p_3 - K_C K_D T_R T_W) s^4 + [p_2 + K_C K_D (T_R - T_W) - K_C K_P T_R T_W] s^3 + [p_1 + K_C K_D - K_C K_I T_R T_W + K_C K_P (T_R - T_W)] s^2 + [p_0 + K_C K_P + K_C K_I (T_R - T_W)] s + K_C K_I \quad (29)$$

که در آن بهره متناسب، انتگرال گیر و مشتق گیر کنترل کننده PID به ترتیب K_D ، K_I ، K_P است. بنابراین شرط لازم پایداری سیستم حلقه بسته با صرف نظر از بهره متناسب کنترل کننده عبارت است از رابطه (۳۰):

$$K_D < \min \left(\frac{P_3}{K_C T_R T_W}, \frac{P_2}{K_C (T_W - T_R)} \right) \quad (30)$$

$$K_I < \frac{P_0}{K_C (T_W - T_R)}$$

اگر بهره مشتق گیر کنترل کننده برابر صفر باشد، شرط لازم پایداری سیستم قدرت عبارت است از رابطه (۳۱):

$$K_I < \min \left(\frac{P_1}{K_C T_R T_W}, \frac{P_0}{K_C (T_W - T_R)} \right) \quad (31)$$

۲-۴- وزن دهی پارامترهای پاسخ خروجی به کمک الگوریتم هایبرید PSO-NM

در الگوریتم PSO هر راه حل تنها یک پرنده در فضای جستجو است و عضو نامیده می شود. تمام پرندگان یک مقدار شایستگی دارند و با تابع شایستگی بهینه شده ارزیابی می شوند. علاوه بر این، هر پرنده i ، یک موقعیت در فضای D بعدی مسئله دارد که در تکرار t ام با یک بردار بصورت رابطه زیر نمایش داده می شود.

همچنین این پرنده سرعتی دارد که پروازش را هدایت می کند و در تکرار t ام با بردار رابطه (۳۲) و (۳۳) نشان داده می شود.

$$X_i^t = (X_i^{t1}, X_i^{t2}, \dots, X_i^{tD}) \quad (32)$$

$$V_i^t = (V_i^{t1}, V_i^{t2}, \dots, V_i^{tD}) \quad (33)$$

و این پرنده نیز در هر تکرار یک حافظه از بهترین موقعیت قبلی خودش را دارد که با بردار P در رابطه (۳۴) تا (۳۶) نشان داده می شود.

$$P_i^t = (p_i^{t1}, p_i^{t2}, \dots, p_i^{tD}) \quad (34)$$

$$V_i(t+1) = wV_i(t) + c_1 r_{1,i}(t)(P_i(t) - X_i(t)) + c_2 r_{2,i}(t)(P_g(t) - X_i(t)) \quad (35)$$

$$X_i(t+1) = X_i(t) + V_i(t+1) \quad (36)$$

در هر تکرار الگوریتم PSO، موقعیت هر ذره با در نظر گرفتن دو مقدار بهتر به روز می شود. فرمول های به روزرسانی در PSO شامل متغیرهایی مانند t (شماره تکرار)، C_1 و C_2 (فاکتورهای یادگیری)، r_1 و r_2 (اعداد تصادفی یکنواخت) و w (وزن جبری) است. مقادیر C_1 و C_2 معمولاً به ۲ تنظیم می شوند تا جابجایی ذرات را در هر تکرار کنترل کنند. r_1 و r_2 اعداد تصادفی در بازه $[0, 1]$ هستند. وزن w در بازه $[0, 1]$ مقداردهی اولیه می شود. با تحلیل پاسخ پله سیستم در حضور کنترل کننده PID، بهبود پاسخ از لحاظ زمان نشست، فراجش و زمان خیز هدف اصلی است. در طراحی کنترل کننده PID علاوه بر تنظیم پارامترهای آن، روش پیشنهاد شونده وزن دهی به خروجی های به دست آمده از پاسخ است. بدین منظور فرض می شود پارامترهای خروجی زمان نشست، فراجش و زمان خیز در پاسخ پله تعریف شود. در این صورت، الگوریتم ممکن است کنترل کننده ای را پیشنهاد کند که با آن پارامترهای به نظر بهینه شده قابلیت پیاده سازی نداشته باشند؛ بنابراین روشی که در اینجا پیشنهاد شده است روش وزن دهی است؛ به صورتی که به هریک از پارامترهای پاسخ خروجی وزن خاصی اختصاص داده می شود. حال این وزن دهی بدین معنی است که هریک از پارامترها در پاسخ به چه میزان اهمیت دارد؛ برای مثال، اگر طراح بخواهد پاسخ پله سیستم دارای فراجش کمتری باشد، می باید وزن کمتری به آن اختصاص دهد [۳۳].

۲-۵- وزن دهی هوشمند پارامترهای پاسخ خروجی

در وزن دهی هوشمند به پارامترها، وزن دهی به صورت انتخاب بازه ای دلخواه برای هریک از پارامترها است؛ برای مثال، اگر پارامتر دیگری اهمیت بیشتری داشته باشد، بازه بزرگتری در انتخاب آن پارامتر در نظر گرفته می شود. انتخاب حد بالا و حد پایین مناسب، عامل مهمی در وزن دهی هوشمند نوع اول است؛ بنابراین الگوریتم تکاملی علاوه بر تنظیم پارامترهای P و I و D کنترل کننده به تعداد پارامترهای خروجی، می باید وزن های مناسبی را برای هر یک از پارامترها تعیین کند. بنابراین تعداد متغیرهای الگوریتم بهینه سازی به





تعداد $N+3$ است که در آن، N تعداد پارامترهای خروجی است که الگوریتم باید برای هر یک از آن‌ها وزن دهی مناسب انجام دهد. در قسمت وزن دهی، با ایجاد بازه‌ای برای هر یک از پارامترها میزان تأثیر و اهمیت هر یک از آن‌ها را تعیین می‌شود؛ برای مثال، فرض کنید که سه پارامتر در خروجی پاسخ سیستم وجود داشته باشد، زمان نشست، فراجش یا اورشوت و زمان خیز که به ترتیب با $MP\%$ ، Tr ، Ts نمایش داده می‌شوند، بنابراین اگر مثلاً برای طراح کم بودن فراجش از بقیه خصوصیات پاسخ خروجی اهمیت بیشتری داشته باشد و به نسبت سرعت رسیدن به جواب نهایی و ماندگار از سرعت گذاری پاسخ سیستم اهمیت بیشتری داشته باشد (اهمیت بیشتر Ts نسبت به Tr) آنگاه با ایجاد قیدی بر روی برنامه، بازه‌های معناداری از حدودی که الگوریتم هوشمند اجازه جستجو در آن فضا را داشته باشد، انتخاب می‌شود تا به هدف خود از لحاظ میزان اهمیت دادن الگوریتم به هر یک از پارامترها دست یابد. بنابراین در روش پیشنهادی این پژوهش، الگوریتم هوشمند PSO، علاوه بر جستجوی بهینه‌ترین مقدار در فضای جستجوی هر پارامتر کنترلی، وزن مناسب با مطلوب طراح تعیین می‌شود تا این شش پارامتر هم زمان به صورتی انتخاب شوند تا مطلوب ترین پاسخ به دست آید [۳۳].

۶-۲- تابع هدف بهینه‌سازی PSO و NM

مهم ترین بخش یک مسئله بهینه‌سازی انتخاب تابع هدفی متناسب با شرایط و قیود موجود است. تابع هدف استفاده شده در این بهینه‌سازی به صورت رابطه (۳۷) است [۳۳].

$$Cost = \sum_{i=1}^n w_i \times \frac{P_i}{\max(P_i) - \min(P_i)} \quad (37)$$

که در آن P_i ها متغیرهای بهینه‌سازی و مخرج کسر داخل سیگما بازه تعیین شده مربوط به هر یک از متغیرها در برنامه هستند. در واقع با این کار، همگی متغیرها نرمالیزه خواهند شد؛ بنابراین به دلیل تفاوت ماهیت و فضای عددی اتخاذ شده هر یک از متغیرهای بهینه‌سازی می‌باید این متغیرها به گونه‌ای در تابع هزینه کنار یکدیگر آورده شوند تا در هزینه نهایی خللی ایجاد نشود. بدین منظور می‌باید هر یک از مقادیر پیشنهادی با الگوریتم PSO را در حوزه و فضای تعریف شد خود نرمالیزه شوند. در ادامه با ذکر یک مثال مسئله روشن‌تر خواهد شد. با فرض اینکه بازه‌های انتخابی برای هر یک از پارامترها از طراح به صورت رابطه (۳۸) باشند.

$$\begin{aligned} k_p &\rightarrow [0 \dots 100], & k_i &\rightarrow [0 \dots 100], \\ k_d &\rightarrow [0 \dots 100], & w_1 &\rightarrow [0 \dots 0.5] \\ w_2 &\rightarrow [0 \dots 0.3], & w_3 &\rightarrow [0 \dots 1], \\ k_p &= 10, & k_i &= 25, & k_d &= 40, & w_1 &= 0.3, & w_2 &= 0.1, & w_3 &= 0.5, \end{aligned} \quad (38)$$

در این انتخاب همان طور که مشاهده می‌شود میزان فضای جستجوی پارامترهای کنترلی، یکسان انتخاب شده است تا الگوریتم تکاملی PSO با جستجوی فضای ممکن در این بازه‌ها، مقدار بهینه را انتخاب می‌کند؛ اما همان طور که در بازه‌های مربوط به وزن دهی داده‌ها مشخص شده است وزن پارامترهای خروجی با اولویت اهمیت به صورت $w_3 > w_1 > w_2$ هستند؛ بنابراین در این صورت پارامتر دارای وزن w_3 اهمیت بیشتری برای تابع بهینه ساز دارد؛ برای مثال یک پاسخ پیشنهادی با الگوریتم PSO بصورت زیر باشد و همچنین پاسخ خروجی دارای $MP=10\%$ ، $Ts=2ms$ و $Tr=0.2ms$ باشد.

در نهایت برای این پاسخ تابع هزینه به دست آمده پس از نرمالیزه کردن هر یک از متغیرها به صورت رابطه (۳۹) حاصل می‌شود.

$$Cost = \left[\frac{\frac{10}{100-0} + \frac{25}{100-0}}{\frac{40}{100-0} + 0.3 \times \frac{10}{100-0}} + \frac{0.1 \times \frac{0.2}{1-0} + 0.5 \times \frac{2}{5-0}}{1} \right] = 1.15 \quad (39)$$

در هر بار تکرار برنامه بهینه‌سازی، ابتدا جواب بهینه اولیه با الگوریتم اجتماع ذرات تعیین می‌شود که این جواب‌ها، جواب‌های ورودی الگوریتم نلدرمید در نظر گرفته می‌شود. اگر الگوریتم هابیرید در یک تکرار، موفق به یافتن پاسخ مناسب تری نشود، آنگاه در تکرار بعدی اعداد دیگری را با توجه به منطق خود پیشنهاد می‌دهد که هزینه کمتری داشته باشد تا در نهایت به بهینه‌ترین پاسخ دست یابد [۳۰].



۳- شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

به منظور پیاده سازی و شبیه‌سازی هر بخش از سیستم همچون توربین، گاورنر، ماشین سنکرون و ... نیازمند پارامترهای نامی سیستم هستیم. لذا در مرحله اول باید پارامترهای نامی تجهیزات سیستم مشخص و تنظیم شود که در جدول (۲) به طور کامل مشخصات نامی هر بخش آورده شده است.

جدول (۲): مشخصات نامی سیستم

پارامتر	مقدار
زمان باز نشانی (T_R)	۵
ثابت زمانی گاورنر (T_G)	۰/۲
بهره گاورنر (K_G)	۱
زمان شروع آب (T_W)	۱
شیب دائمی افتی (RP)	۰/۰۵
شیب موقتی افتی (R_T)	۰/۳۸
ثابت اینرسی (J_M)	۶
ثابت دمپینگ (D_M)	۱

جدول (۳): مقادیر اولیه ای الگوریتم بهینه‌سازی PSO-NM

پارامتر	مقدار
متغیرها	۳
تعداد ذرات	۱۰
C_1	۱/۲
C_2	۰/۵

در موضوع بهینه‌سازی نیز لازم است که مقادیر اولیه‌ای بر مبنای الگوریتم فراابتکاری استفاده شده، مشخص شود که با توجه به الگوریتم این پژوهش که ترکیب ازدحام ذرات و نلدر مید است پارامترهای مورد نیاز وارد شده که در جدول (۳) آورده شده است. مقادیر قرار داده شده بر مبنای سایر مقالات بهینه‌سازی است و مقادیر C_1 بر روی ۱.۲ و C_2 مقدار ۰/۵ تنظیم شده است. همچنین تعداد متغیرهای جست و جو در الگوریتم بهینه ساز سه پارامتر K_p ، K_i و K_d می‌باشد که دامنه ی جست و جو برای هر سه پارامتر در بازه ۰ تا ۱۰۰ تنظیم شده است. نتایج شبیه‌سازی در دو حالت ارائه شده است که در حالت اول پارامترهای کنترل کننده به صورت سعی و خطا تنظیم شده است و در حالت دوم مقادیر کنترل کننده بهینه شده اند. در جدول (۳) مقادیر سعی و خطا و همچنین بهینه شده ی کنترل کننده PID ارائه شده است. نکته حائز اهمیت در پارامترهای کنترل کننده PID این است که مقادیر کنترل کننده PID ثابت فرضی می‌شود و با تغییر مقدار پارامترهای ثابت سیستم (مقادیر نامی در جدول (۱)) همچون T_r ، T_g ، T_w ، T_r و ... ضرایب کنترل کننده تغییر نمی‌کند. در شکل‌های (۵) الف-د، منحنی پاسخ فرکانس سیستم توربین برق آبی با تغییرات مقدار T_w و با مقادیر سعی و خطا در تنظیم کنترل کننده ($K_p=2$ ، $K_i=5$ و $K_d=15$) را نشان داده شده است. محور y مقدار انحراف فرکانس (Δf) را نشان داده و محور x نیز نشان دهنده تعداد نمونه‌ها در یک دوره زمانی می‌باشد و مبین ۶۰ ثانیه می‌باشد. به عبارتی نمونه ۵۰ مبین ثانیه ۱۵ خواهد بود. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش مقدار T_w میزان انحراف اولیه بیشتر شده و مقدار زمان نشست نیز افزایش می‌یابد.

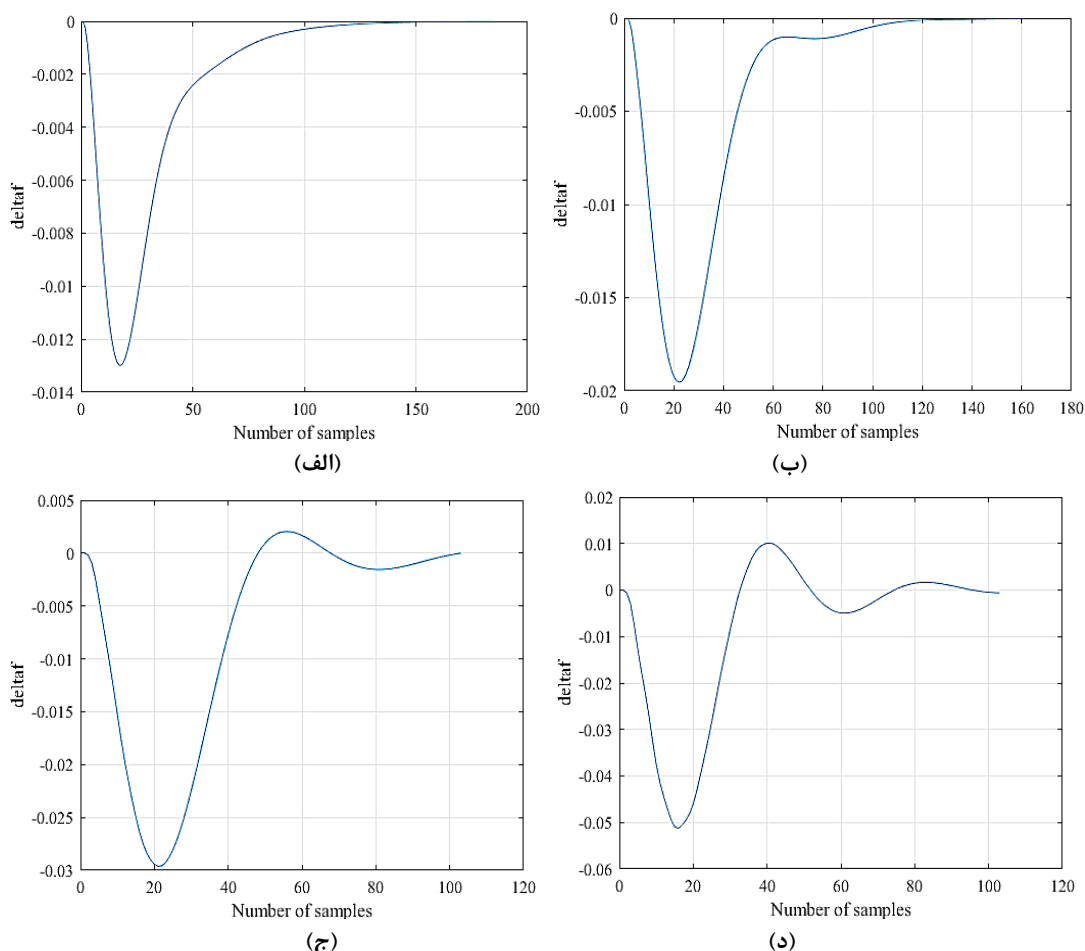
یکی از نکات مهم این است که پارامترهای تنظیم شده برای کنترل کننده PID می‌تواند محدوده کوچکی از تغییرات بار را جبران کرده و سیستم حلقه بسته را پایدار نماید و در صورت تجاوز بیش از اندازه در مقادیری همچون T_w سبب می‌شود تا کنترل کننده دچار اورشوت‌ها و زمان نشست بیشتر شود. در شکل (۵) د- نیز این موضوع دیده می‌شود به طوری که کنترل کننده PID توانسته تا $T_w=3$ سیستم را بدون اورشوت و کمترین نوسان منحنی Δf را به صفر همگرا کند اما در $T_w=4$ مشاهده می‌شود که منحنی Δf دچار چندین نوسان و اورشوت در پاسخ سیستم شده است. با این وجود هدف اصلی از این پژوهش بهینه‌سازی پارامترهای کنترل کننده PID است که با استفاده از الگوریتم ترکیبی PSO-NM به دست آمده است همانطور که در جدول (۴) نشان داده شده مقادیر جدید ضرایب



کنترل کننده PID، عبارتند از: $K_p=2$ ، $K_i=5$ و $K_d=15$. از این رو در شکل ۶ الف-د منحنی Δf با $T_w=1$ تا $T_w=4$ و با مقادیر بهینه شده ی کنترل کننده PID نشان داده شده است.

جدول (۴): پارامترهای تنظیم شده ی کنترل کننده PID

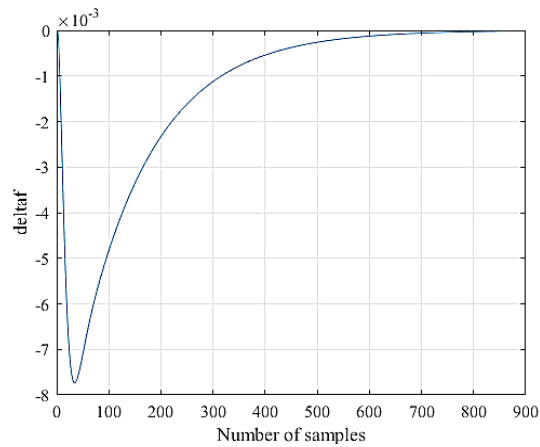
پارامتر کنترل کننده	مقدار (سعی و خطا)	مقدار (بهینه شده)
K_p	۲	۲/۵
K_i	۵	۰/۱
K_d	۱۵	۱۰



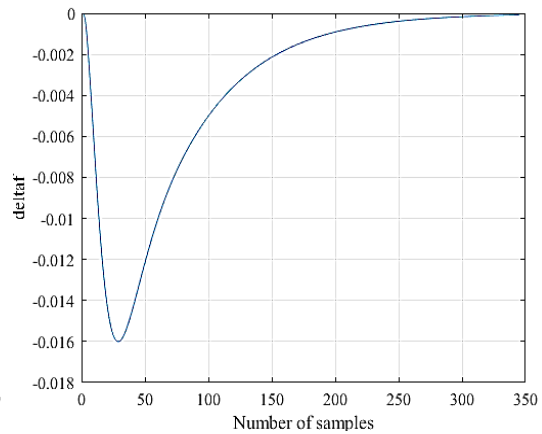
شکل (۵): پاسخ فرکانس سیستم برق آبی: الف) $T_w=1$ ، ب) $T_w=2$ ، ج) $T_w=3$ و د) $T_w=4$ با ضرایب PID غیر بهینه (سعی و خطا)

به منظور ارزیابی و مقایسه میان PID غیر بهینه و PID بهینه، مقدار T_w را افزایش می‌دهیم تا قدرت همگرایی و پایداری کنترل کننده بهینه را بررسی نماییم از این رو در شکل‌های (۶) ه-و ی پاسخ فرکانس سیستم برق آبی در $T_w=5$ و $T_w=6$ نیز نشان داده شده است. در شکل (۶) ی پاسخ فرکانسی سیستم برق آبی در $T_w=6$ با ضرایب PID بهینه شده را نشان می‌دهد که دارای یک اورشوت در پاسخ است اما با مقایسه با شکل (۵) د که پاسخ فرکانس سیستم برق آبی در $T_w=4$ با ضرایب PID غیر بهینه (سعی و خطا) را نشان می‌دهد به راحتی می‌توان تفاوت بین دو کنترل کننده را مشاهده نمود. به طوری که مقدار نوسان‌ها در پاسخ فرکانس سیستم برق آبی با کنترل کننده PID بهینه شده در $T_w=6$ نیز از مقدار نوسان‌ها در پاسخ فرکانس سیستم برق آبی با کنترل کننده PID غیر بهینه در $T_w=4$ نیز کمتر است و این موضوع قدرت بهینه‌سازی و دستیابی به پارامترهای بهینه در کنترل کننده PID را نشان می‌دهد.

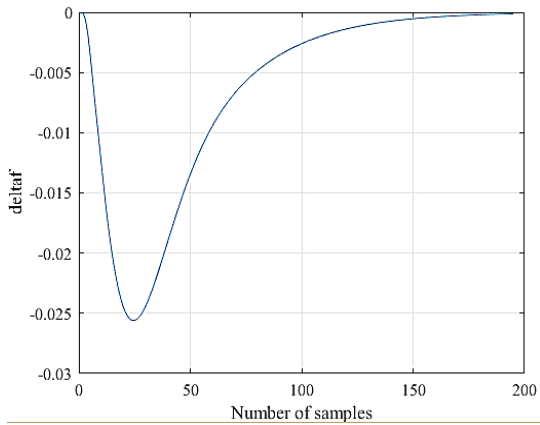




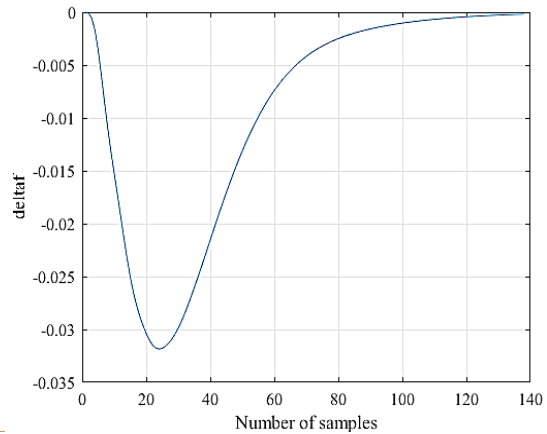
(الف)



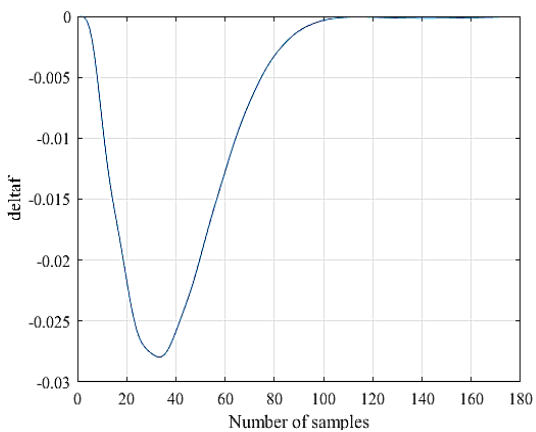
(ب)



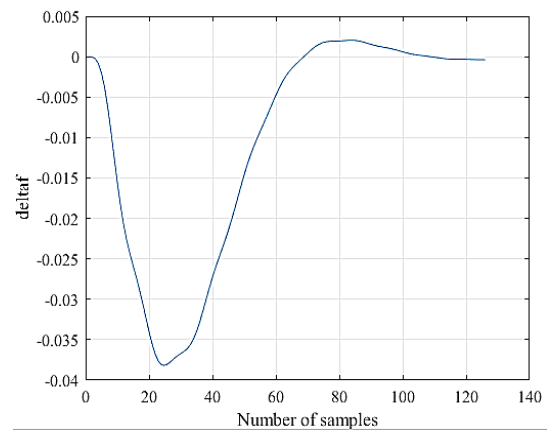
(ج)



(د)



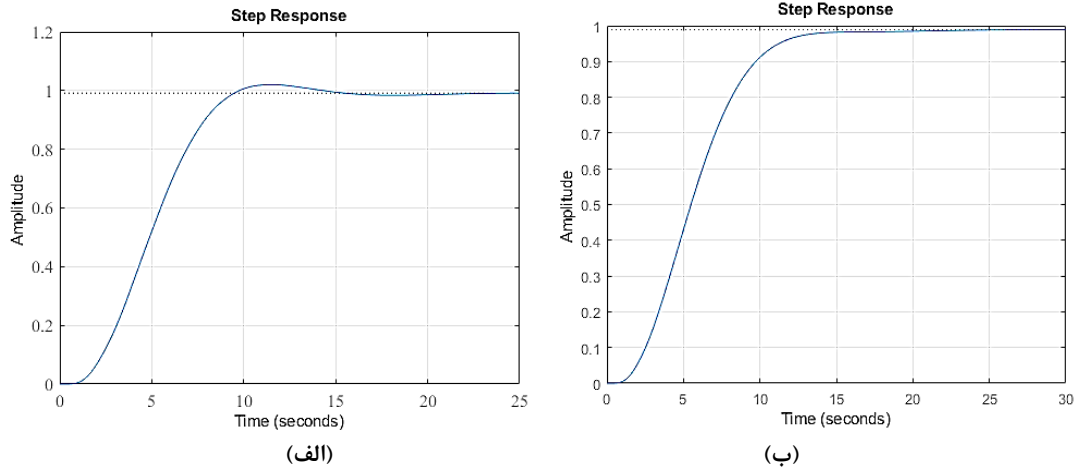
(ه)



(ی)

شکل (۶): پاسخ فرکانس سیستم برق آبی: الف) $T_w=1$ ، ب) $T_w=2$ ، ج) $T_w=3$ ، د) $T_w=4$ ، ه) $T_w=5$ و ی) $T_w=6$ با ضرایب PID بهینه شده





شکل (۷): پاسخ پله توان مکانیکی خروجی توربین آبی: (الف) PID بهینه نشده، (ب) خروجی توربین آبی با PID بهینه شده
 در شکل‌های (۷) الف و (۷) ب منحنی توان‌های مکانیکی خروجی در شرایط با PID بهینه نشده و PID بهینه شده نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود هنگامی که از ضرایب کنترل کننده PID بهینه شده استفاده می‌شود ریبیل و نوسان خروجی توان به شدت کاهش یافته و بدون اورشوت به مقدار نامی $P=1P.U$ می‌رسد. لذا در یک نتیجه کلی می‌توان نقش غیر قابل انکار کنترل کننده در پایداری توان و فرکانس سیستم توربین آبی متصل به شین بی نهایت را درک نمود. علاوه بر این ضرایب کنترل کننده و تنظیم مناسب آن که می‌توان با سعی و خطا و یا بهینه‌سازی باشد به پایداری بیشتر سیستم کمک نمود و نتایج نشان می‌دهد که کنترل کننده PID شده پاسخ‌های مطلوب تری نسبت به کنترل کننده PID با مقادیر تصادفی و یا سعی و خطا در پی خواهد داشت.

۴- نتیجه گیری

این مقاله به بررسی LFC در سیستم‌های قدرت با تمرکز بر توربین‌های آبی مجهز به جبران کننده افتی گذرا می‌پردازد. الگوریتم ترکیبی PSO_NM برای بهینه‌سازی پارامترهای کنترل کننده PID مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که این الگوریتم قادر به محاسبه ضرایب بهینه PID برای LFC است، اما باید برای مقادیر نامی سیستم تنظیم شود. کنترل کننده PID بهینه شده، عملکرد بهتری در مقایسه با PID غیر بهینه دارد و می‌تواند طیف وسیع تری از تغییرات پارامترهای سیستم را تحمل کند. این بهینه‌سازی منجر به کاهش نوسانات و اورشوت‌ها در سیگنال‌های فرکانس و توان خروجی می‌شود، و در نتیجه، پایداری و عملکرد سیستم را بهبود می‌بخشد.

یافته‌های اصلی این مقاله عبارتند از:

۱. الگوریتم PSO_NM می‌تواند ضرایب بهینه PID را برای توربین‌های آبی LFC محاسبه کند. این امر باعث می‌شود که کنترل کننده PID با دقت بیشتری عمل کند و به تغییرات در سیستم پاسخ دهد.
۲. ضرایب PID باید برای مقادیر نامی سیستم تنظیم شوند. اگر پارامترهای سیستم تغییر کنند، کنترل کننده PID ممکن است نتواند به درستی عمل کند و باعث ناپایداری سیستم شود.
۳. ضرایب PID بهینه شده باعث کاهش نوسانات و اورشوت در سیگنال Δf می‌شود. این امر به معنای پایداری بیشتر فرکانس سیستم است.
۴. کنترل کننده PID بهینه شده می‌تواند تغییرات گسترده تری در پارامترهای سیستم را تحمل کند. در حالی که کنترل کننده PID غیر بهینه ممکن است در $T_w=3$ بدون اورشوت عمل کند، کنترل کننده بهینه تا $T_w=5$ بدون اورشوت سیستم را پایدار نگه می‌دارد.
۵. کنترل کننده PID بهینه شده با PSO-NM نوسانات کمتری در سیگنال توان خروجی دارد و بدون اورشوت، توان خروجی را تثبیت می‌کند.

این مقاله نشان می‌دهد که بهینه‌سازی پارامترهای PID با استفاده از الگوریتم PSO_NM می‌تواند عملکرد LFC در سیستم‌های قدرت با توربین‌های آبی را بهبود بخشد، به ویژه در شرایطی که پارامترهای سیستم تغییر می‌کنند. این امر در نهایت به حفظ پایداری و کیفیت توان در سیستم‌های قدرت کمک می‌کند.



- [1] Q. P. Ha and H. Trinh, "A variable structure-based controller with fuzzy tuning for load-frequency control," *International Journal of Power and Energy Systems*, vol. 20, no. 3, 2000, Accessed: Mar. 27, 2025. [Online]. Available: <https://researchonline.jcu.edu.au/12891/>
- [2] S. Pothiya, I. Ngamroo, S. Runggeratigul, and P. Tantaswadi, "Design of optimal fuzzy logic based PI controller using multiple tabu search algorithm for load frequency control," *Int J Control Autom Syst*, vol. 4, no. 2, 2006, Accessed: Mar. 27, 2025. [Online]. Available: <https://www.ijcas.org/journal/view.html?uid=368&vmd=Full>
- [3] S. Doolla and T. S. Bhatti, "Load frequency control of an isolated small-hydro power plant with reduced dump load," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 21, no. 4, 2006, doi: 10.1109/TPWRS.2006.881157.
- [4] G. Shahgholian, S. Yazdekhashti, and P. Shafaghi, "Dynamic analysis and stability of the load frequency control in two area power system with steam turbine," in *2009 International Conference on Computer and Electrical Engineering, ICCEE 2009*, 2009. doi: 10.1109/ICCEE.2009.95.
- [5] G. Shahgholian, P. Shafaghi, and H. Mahdavi-Nasab, "A comparative analysis and simulation of ALFC in single area power system for different turbines," in *ICECT 2010 - Proceedings of the 2010 2nd International Conference on Electronic Computer Technology*, 2010. doi: 10.1109/ICECTECH.2010.5479992.
- [6] W. Tan, "Unified tuning of PID load frequency controller for power systems via IMC," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 25, no. 1, 2010, doi: 10.1109/TPWRS.2009.2036463.
- [7] K. Vrdoljak, N. Perić, and I. Petrović, "Sliding mode based load-frequency control in power systems," *Electric Power Systems Research*, vol. 80, no. 5, 2010, doi: 10.1016/j.epsr.2009.10.026.
- [8] M. Tushir and S. Srivastava, "Application of a hybrid controller in load frequency control of hydro-thermal power system," in *2012 IEEE 5th Power India Conference, PICONF 2012*, 2012. doi: 10.1109/PowerI.2012.6479477.
- [9] A. Yazdizadeh, M. H. Ramezani, and E. Hamedrahmat, "Decentralized load frequency control using a new robust optimal MISO PID controller," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 35, no. 1, 2012, doi: 10.1016/j.ijepes.2011.09.007.
- [10] K. P. S. Parmar, S. Majhi, and D. P. Kothari, "Load frequency control of a realistic power system with multi-source power generation," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 42, no. 1, 2012, doi: 10.1016/j.ijepes.2012.04.040.
- [11] P. Bhatt, S. P. Ghoshal, and R. Roy, "Coordinated control of TCPS and SMES for frequency regulation of interconnected restructured power systems with dynamic participation from DFIG based wind farm," *Renew Energy*, vol. 40, no. 1, 2012, doi: 10.1016/j.renene.2011.08.035.
- [12] P. Bhatt, S. P. Ghoshal, and R. Roy, "Load frequency stabilization by coordinated control of thyristor controlled phase shifters and superconducting magnetic energy storage for three types of interconnected two-area power systems," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 32, no. 10, 2010, doi: 10.1016/j.ijepes.2010.06.009.
- [13] Y. Mi, Y. Fu, C. Wang, and P. Wang, "Decentralized sliding mode load frequency control for multi-area power systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 4, 2013, doi: 10.1109/TPWRS.2013.2277131.
- [14] D. G. Padhan and S. Majhi, "A new control scheme for PID load frequency controller of single-area and multi-area power systems," *ISA Trans*, vol. 52, no. 2, 2013, doi: 10.1016/j.isatra.2012.10.003.
- [15] S. Sondhi and Y. V. Hote, "Fractional order PID controller for load frequency control," *Energy Convers Manag*, vol. 85, 2014, doi: 10.1016/j.enconman.2014.05.091.
- [16] M. Mahdavian, G. Shahgholian, M. Janghorbani, B. Soltani, and N. Wattanapongsakorn, "Load frequency control in power system with hydro turbine under various conditions," in *ECTI-CON 2015 - 2015 12th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*, 2015. doi: 10.1109/ECTICon.2015.7206938.
- [17] E. J. Oliveira, L. M. Honório, A. H. Anzai, L. W. Oliveira, and E. B. Costa, "Optimal transient droop compensator and PID tuning for load frequency control in hydro power systems," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 68, 2015, doi: 10.1016/j.ijepes.2014.12.071.
- [18] M. Emadi, H. R. Massrur, E. Rokrok, and A. Samanfar, "A Comprehensive Framework for Optimal Stochastic Operating of Energy Hubs Integrated with Responsive Cooling, Thermal and Electrical





- Loads, and Ice Storage System by an Improved Self-Adaptive Slime Mold Optimization Algorithm,” *Technovations of Electrical Engineering in Green Energy System*, vol. 2, no. 1, pp. 77–95, 2023, doi: 10.30486/teeges.2022.1969195.1043.
- [19] J. Zou, M. Pipattanasomporn, S. Rahman, and X. Lai, “A Frequency Regulation Framework for Hydro Plants to Mitigate Wind Penetration Challenges,” *IEEE Trans Sustain Energy*, vol. 7, no. 4, 2016, doi: 10.1109/TSTE.2016.2569560.
- [20] S. V. Kamble and S. M. Akolkar, “Load frequency control of micro hydro power plant using fuzzy logic controller,” in *IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering, ICPCSI 2017*, 2018. doi: 10.1109/ICPCSI.2017.8392021.
- [21] D. A. Pham, F. Nollet, N. Essounbouli, and A. Hamzaoui, “Voltage and Frequency Regulation for Wound Rotor Synchronous Generator in Micro Hydro Power Plants with Real-Time Implementation,” in *Proceedings of 2017 International Renewable and Sustainable Energy Conference, IRSEC 2017*, 2018. doi: 10.1109/IRSEC.2017.8477386.
- [22] P. Khademi Astaneh and H. Sheikh Shahrokh Dehkordi, “Integrated Optimal Active and Reactive Power Planning in Smart Microgrids with Possibility of One-Hour Islanding,” *Technovations of Electrical Engineering in Green Energy System*, vol. 2, no. 2, pp. 36–50, 2023.
- [23] S. Rozada, D. Apostolopoulou, and E. Alonso, “Deep multi-agent Reinforcement Learning for cost-efficient distributed load frequency control,” *IET Energy Systems Integration*, vol. 3, no. 3, 2021, doi: 10.1049/esi2.12030.
- [24] F. Liang, W. Jiafu, and H. Bo, “Research on influence factors of primary frequency regulation contribution electric energy of hydropower unit,” in *2019 3rd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration: Ubiquitous Energy Network Connecting Everything, EI2 2019*, 2019. doi: 10.1109/EI247390.2019.9061900.
- [25] K. Nagode, I. Škrjanc, and B. Murovec, “Enhanced stability and failure avoidance of hydropower plant in contingent island operation by model predictive frequency control,” *Energy Reports*, vol. 8, 2022, doi: 10.1016/j.egy.2022.07.040.
- [26] D. A. Asoh, E. N. Mbinkar, and A. N. Moutlen, “Load Frequency Control of Small Hydropower Plants Using One-Input Fuzzy PI Controller with Linear and Non-Linear Plant Model,” *Smart Grid and Renewable Energy*, vol. 13, no. 01, 2022, doi: 10.4236/sgre.2022.131001.
- [27] N. K. Jena, S. Sahoo, B. K. Sahu, J. Ranjan Nayak, and K. B. Mohanty, “Fuzzy adaptive selfish herd optimization based optimal sliding mode controller for frequency stability enhancement of a microgrid,” *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 33, 2022, doi: 10.1016/j.jestech.2021.10.003.
- [28] R. Hasan, M. S. Masud, N. Haque, and M. R. Abdussami, “Frequency control of nuclear-renewable hybrid energy systems using optimal PID and FOPID controllers,” *Heliyon*, vol. 8, no. 11, 2022, doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e11770.
- [29] J. B. Ekanayake, N. Jenkins, and G. Strbac, “Frequency response from wind turbines,” *Wind Engineering*, vol. 32, no. 6, 2008, doi: 10.1260/030952408787548811.
- [30] N. Kishor, S. P. Singh, and A. S. Raghuvanshi, “Dynamic simulations of hydro turbine and its state estimation based LQ control,” *Energy Convers Manag*, vol. 47, no. 18–19, 2006, doi: 10.1016/j.enconman.2006.03.020.
- [31] S. S. Lee and J. K. Park, “Design of reduced-order observer-based variable structure power system stabiliser for unmeasurable state variables,” *IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution*, vol. 145, no. 5, 1998, doi: 10.1049/ip-gtd:19982180.
- [32] F. J. De Marco, N. Martins, and J. C. R. Ferraz, “An automatic method for power system stabilizers phase compensation design,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 2, 2013, doi: 10.1109/TPWRS.2012.2209208.
- [33] A. Arezooye Araghi, A. Ahmarinejad, M. Alizadeh, and M. Babaei, “Optimizing Energy and Ancillary Services Markets in Transmission and Distribution Networks Through a Two-Stage Optimal Framework Considering Flexible Loads, Electric Vehicles, and Storage Systems,” *Technovations of Electrical Engineering in Green Energy System*, vol. 2, no. 4, pp. 38–64, 2024, doi: 10.30486/teeges.2023.1986699.1074.



-
- ¹ Load Frequency Control
 - ² Fuzzy Logic Proportional – Integral
 - ³ Automatic Load Frequency Control
 - ⁴ Hydro Turbine
 - ⁵ Proportional – Integral – Derivative
 - ⁶ Two Degree Free
 - ⁷ Doubly Feed Induction Generator
 - ⁸ Superconducting Magnetic Energy Storage
 - ⁹ Multi-agent Controller
 - ¹⁰ Reliability
 - ¹¹ Proportional-Integral-Derivative

